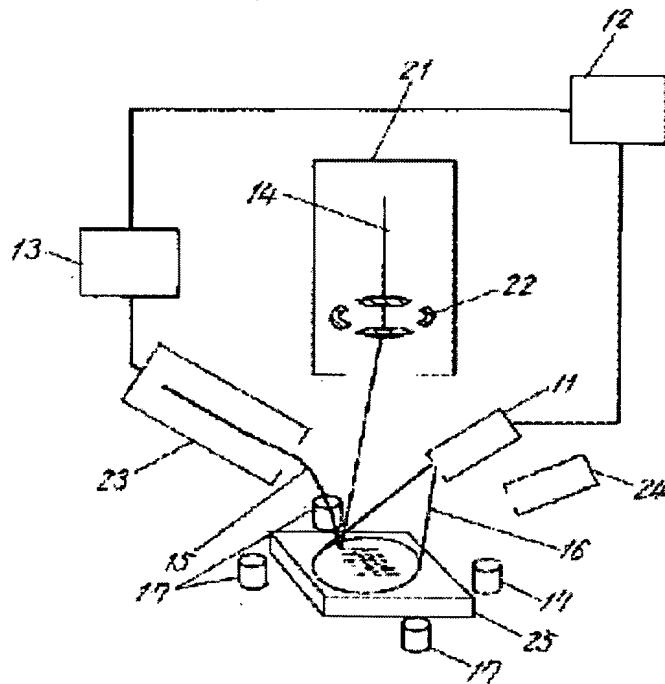


SEMICONDUCTOR ANALYSIS DEVICE AND ANALYSIS METHOD

Patent number: JP2001144155
Publication date: 2001-05-25
Inventor: NAMURA TAKASHI
Applicant: MATSUSHITA ELECTRONICS CORP
Classification:
- **international:** G01B15/00; G01N23/227; H01L21/66; G01B15/00;
G01N23/22; H01L21/66; (IPC1-7): H01L21/66;
G01B15/00; G01N23/227
- **european:**
Application number: JP19990327997 19991118
Priority number(s): JP19990327997 19991118

Report a data error here**Abstract of JP2001144155**

PROBLEM TO BE SOLVED: To solve the problem of inability to detect the potential difference among P-N junctions due to the charging of an interface level in a conventional Auger electron spectroscope. **SOLUTION:** A constitution, where a function 11 for irradiating a sample surface with a light having energy larger than the band gap of a sample and smaller than the work function of the sample and functions 12 and 13 modulating light intensity and detecting the fluctuation components of Auger electron intensity synchronized with light intensity added in addition to the function of a conventional Auger electron spectral device are added, is arranged. Plural photodetectors, which adjust an optical axis, are arranged near the optical axis of light irradiating the sample surface.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

THIS PAGE BLANK (USPTO)

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2001-144155

(P2001-144155A)

(43)公開日 平成13年5月25日 (2001.5.25)

(51)Int.Cl.⁷

H 01 L 21/66
G 01 B 15/00
G 01 N 23/227

識別記号

F I

H 01 L 21/66
G 01 B 15/00
G 01 N 23/227

テ-マコト^{*}(参考)

Q 2 F 0 6 7
B 2 G 0 0 1
4 M 1 0 6

審査請求 未請求 請求項の数 5 O.L. (全 10 頁)

(21)出願番号

特願平11-327997

(22)出願日

平成11年11月18日 (1999.11.18)

(71)出願人 000005843

松下電子工業株式会社

大阪府高槻市幸町1番1号

(72)発明者 名村 高

大阪府高槻市幸町1番1号 松下電子工業
株式会社内

(74)代理人 100097445

弁理士 岩橋 文雄 (外2名)

最終頁に続く

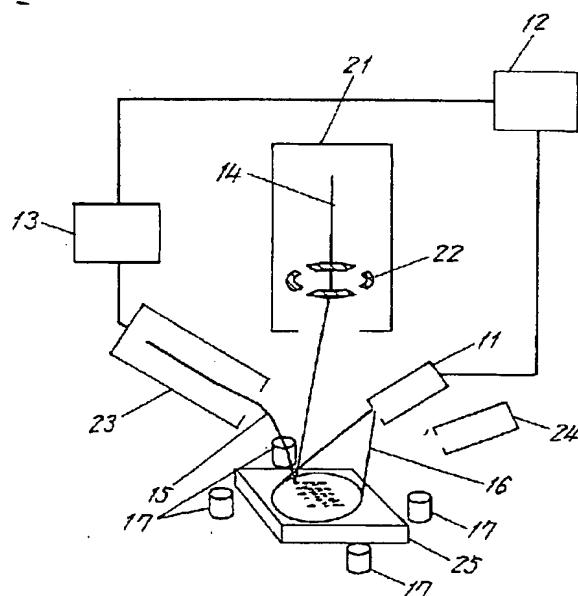
(54)【発明の名称】 半導体解析装置および解析方法

(57)【要約】

【課題】 従来のオージェ電子分光装置では界面準位の
帶電により、P N接合間の電位差を検出できない。

【解決手段】 本発明では、従来のオージェ電子分光装
置の機能に加え、試料表面に試料のバンドギャップより
大きくかつ試料の仕事関数より小さいエネルギーを持つ
光を照射する機能11と、その光強度を変調しそれと同
期したオージェ電子強度の変動成分を検出する機能1

2、13を付加した構成を有している。また、試料表面
を照射する光の光軸の近くに、光軸の調整を行う複数個
の光検出器を備えている。



【特許請求の範囲】

1

【請求項1】 半導体試料表面に光を照射する照明手段と、前記半導体試料表面を所定のビーム径をもつ電子線で走査する電子線走査手段と、前記半導体試料表面から発生する電子を運動エネルギー分析して検出する電子エネルギー分析手段とを備えた半導体解析装置。

【請求項2】 半導体試料表面を照射する光のエネルギーが前記半導体試料のエネルギーギャップより大きく、かつ、前記半導体試料の仕事関数より小さいことを特徴とする請求項1に記載の半導体解析装置。

【請求項3】 半導体試料表面を照射する光の強度を周期的に変調する変調手段と、変調信号と同期して電子検出手段の出力の強度と位相とを抽出する同期検波手段とを備えたことを特徴とする請求項1に記載の半導体解析装置。

【請求項4】 半導体試料表面を照射する光の光軸の近くに複数個の光検出器を備えたことを特徴とする請求項1に記載の半導体解析装置。

【請求項5】 半導体試料表面より放出される特定のオージェ電子の運動エネルギーの微小変位を検出する際に、オージェスペクトルにおけるピーク近傍の最大傾斜付近に電子エネルギー分析装置の分析エネルギーを固定した時の第1の信号強度と、前記ピークから離れたところに前記電子エネルギー分析装置の分析エネルギーを固定した時の第2の信号強度とを求め、前記第2の信号強度に対する前記第1の信号強度の比を求めるることを特徴とする請求項1に記載の半導体解析方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 半導体装置の微細化はMOSトランジスタの最小ゲート長でいわゆるディープサブミクロンの領域に達し、PN接合の形状についても、従来は深さ方向の一次元的な制御で十分であったのが、横方向の制御的重要性が増しており、高性能と高信頼性を実現するうえで、半導体装置を構成するPN接合の横方向の広がりを解析する技術が切望されている。

【0002】 ここで、MOS型トランジスタにおいて基板とPN接合を形成しているドレイン電極を例にとり、PN接合の横方向制御（「ドレンエンジニアリング」）の重要性が増した歴史をたどってみる。MOS型トランジスタは飽和電流とホットキャリア信頼性を同時に確保するためにゲート電極の下のドレイン電極PN接合部の電界強度があまり大きくならないように工夫する必要がある。この電界強度はドレイン電極の横方向のキャリアプロファイルに強く依存する。従来、半導体装置の基板表面における平面寸法の最小値が $1\text{ }\mu\text{m}$ かそれより少し小さいサブミクロンの世代には、このドレイン電極のPN接合で発生する電界を弱めるために、LDD構造などの横方向のキャリアプロファイルを改良したドレイン電極構造が用いられていた。LDD構造は、通常、ゲート電

2

極のサイドウォールを形成する工程の前後でドレイン電極を形成する不純物のイオン注入を行い、前者の注入量を制限することで作製される。すなわち、LDD構造は、ドレイン電極のうちゲート電極に近い横方向のキャリア濃度を抑え、そのことによって電界強度を緩和するというものである。この構造のドレイン電極の深さは、およそ $0.2\sim0.3\text{ }\mu\text{m}$ である。ところが、平面寸法の最小値が $0.2\text{ }\mu\text{m}$ より小さいディープサブミクロン世代以降は、ドレイン電極も $0.05\text{ }\mu\text{m}$ を切るような寸法でキャリアプロファイルを制御する必要があり、単純に不純物イオン注入のエネルギーを減少させ注入深さを小さくしたり、熱処理を減少させることで不純物の拡散を防いだりする方法では限界があった。そこで、ドレイン電極を形成する不純物と反対の導電型の不純物をドレイン電極を形成するイオン注入よりやや深い位置にイオン注入するいわゆるポケット注入が必要となっている。この方法では反対の導電型のイオン注入について、イオン種や注入エネルギー、注入量、入射角などを選べるので、ドレイン電極端のキャリアプロファイル制御の自由度が増し、高性能なデバイスが実現できるものと期待されている。しかし、このようなプロセスの複雑化により、キャリアプロファイルの測定が困難となっており、さらに、不純物がドナーやアクセプタとして活性化される割合も問題となることも分かってきており、ドレイン電極作製方法の最適化が技術的に難しくなっている。

【0003】 本発明は、ディープサブミクロン世代のキャリアプロファイルの測定という新たな課題に対応する半導体解析装置とその利用方法に関するものである。

【0004】

【従来の技術】 従来からある横方向のPN接合評価技術のうち代表的なものを挙げると、（1）MOSトランジスタの電気特性から横方向の接合間距離を推定する方法や、（2）劈開などにより露出した断面を化学的にエッティングし、PN接合を顕在化する方法がある。

【0005】 このうち、（1）の方法は、実効的な接合間距離を求める方法であり、MOSトランジスタの性能を最適化する構造的指針を得るには不十分である。また、（2）の方法は、化学エッティングの条件によって得られる結果が大きく異なるので、再現性の点で問題がある。

【0006】 これらの従来の技術に対し、新たな試みもなされている。そのほとんどは、断面を露出させ、そこに、電子ビームや、導電性プローブを走査し、得られる信号の変化よりPN接合を判定するものであり、例えば、電子ビームの場合は二次電子やオージェ電子の変化などをとらえ、導電性プローブの場合は、容量や抵抗の変化などをとらえる。これらの方法は、いずれ多くの技術的な課題をかかえており、実用化はこれから段階といえる。

【0007】 ここで、電子ビームを利用する方法の一つ

として、従来のオージェ電子分光装置を用いた物理解析の方法と、オージェ電子分光装置をPN接合評価へ応用する従来の取り組みについて述べる。

【0008】オージェ電子とは原子の電子軌道間で起こるオージェ遷移（オージェ崩壊）過程に伴って原子より放出される電子のことと、オージェ遷移過程は電子線照射等によって引き起こされる。オージェ電子は関係する電子軌道に特有のエネルギーを持つので、逆に放出された電子の運動エネルギーとその強度からその元素と存在量を特定することが可能である。さらに、オージェ電子は固体と相互作用してすぐに減衰するので、固体表面から通常数nmの深さの情報のみを反映しており、オージェ電子を観察することによって表面に極めて敏感な情報を得ることが出来る。

【0009】従来のオージェ電子分光装置の構造を図2に示す。図2において21は電子銃、22は走査用電磁コイル、23は電子エネルギー分析装置、24はイオン銃、25は被測定試料である。

【0010】図2には詳しく記載しないが、電子銃21は、電子線を偏向して走査するための走査用電磁コイル22の他に、電子を放出する陰極と電子を加速する電極系、電子を収束させる電磁レンズなどから構成されている。また、電子エネルギー分析装置23は、所望するエネルギーを持つ電子を選択的に透過するエネルギーフィルターと透過した電子を検出する高感度の電子検出器などから構成されている。また、イオン銃24は試料表面をスパッタにより削り試料内部を露出するために用いる。

【0011】試料表面25より放出される様々なエネルギーをもつ電子の中から、元素固有のエネルギーを有するオージェ電子を電子エネルギー分析装置23により検

$$n_n/n_p = p_n/p_p = \exp(eV_a/kT)$$

(1)

ここで、 n_n, n_p, p_n, p_p はそれぞれPN接合のN側の電子濃度、P側の電子濃度、P側の正孔濃度、N側の正孔濃度であり、 n_n/n_p および、 p_n/p_p は電子または正孔のPN両側の濃度の変化率を表している。また、 V_a はPN接合間の電位差（拡散電位）でeは電気素量、kはボルツマン定数、Tは絶対温度である。従って、試料表面のオージェ電子の運動エネルギーシフトの分布（つまり V_a の分布）から試料表面の電位分布が得られ、そこから、(1)式の関係を用いれば、キャリア濃度の相対分布が得られるので、PN接合の形状を二次元的に解析できると期待されている。なお、(1)式では濃度比が得られるだけなので、濃度の絶対値を得るには、基準とする適当な1点の濃度をあらかじめ知っておく必要がある。シリコン基板のキャリア濃度などを基準にすれば良い。

【0015】ここで、オージェ電子の運動エネルギーシフト量をオージェスペクトルのシフトから算出する方法を説明しておく。

* 出すことにより、試料の元素組成を知ることが出来る。走査用電磁コイル22により電子線を試料表面で走査しながら逐次同様の測定をすることによって注目する元素の二次元的な分布を得ることが出来る。さらに、イオン銃24で表面を削りながら測定を行うことにより注目する元素の深さ方向の分析も可能である。このように、オージェ電子分光装置を応用することによって試料の組成に関する三次元的な情報を容易に得ることが出来る。従って、物理解析に極めて有効な技術であり、半導体装置等の材料解析に広く利用されている。

【0012】さて、このオージェ電子分光装置により、半導体装置のPN接合を評価する基本的な原理は、以下の様なものである。オージェ電子は、電子軌道間の遷移に伴う電子放出であるので、その運動エネルギーは原子の化学状態が決まれば一定に決まる。ただし、オージェ電子を発生する原子の存在する位置の電位がオージェ電子検出装置の基準電位と異なれば、電子が飛行している間にその分だけ電子が加速または減速されるので、検出されたときのオージェ電子の運動エネルギーがシフトする。すなわち逆にこの運動エネルギーのシフト量からオージェ電子を発生した原子が存在している位置の電位の情報を得られる。従って、元素分析と同時に、表面の電位をとらえることが出来る。

【0013】一方、バルクの半導体では、平衡状態における電位差（拡散電位）とキャリア濃度の変化の間には以下の関係がある。なお、この時の電位の基準は半導体の価電子帯をとっても良いし、伝導帯をとっても良く、同様にオージェ遷移に関わる電子軌道の電位を基準にとっても良い。

【0014】

【0016】まず、電子エネルギー分析装置で実際に測定される「オージェスペクトル」の意味を明確にするため、一般に固体表面から放出されるオージェ電子の運動エネルギーの分布について若干解説する。

【0017】実際に固体表面から放出される特定の軌道間の遷移に関わるオージェ電子をエネルギー分析すると、ある運動エネルギーでピークを持ち一定の運動エネルギーの広がりをもって検出される。この運動エネルギーの広がりは、電子エネルギー分析装置のエネルギー分解能をいくら良くしても消えない。この運動エネルギーの広がりの主な原因は、オージェ電子が固体内部の原子で発生してから真空中へ脱出するまでの間に、固体内部で様々な非弾性散乱を受け、運動エネルギーの一部を失うためである。

【0018】図3(a)は実際にシリコン表面から検出されるオージェスペクトルのうち8.9eV付近のスペクトルを模式的に示したものである。このオージェスペクトルはオージェ遷移がJ軌道と価電子軌道（価電子軌道はM

軌道)で起こり、その結果、価電子軌道から電子が放出されたことにより発生する。なお、測定の都合で、同じ波形の微分波形を検出器からの出力として得る場合もあるが、ここでは微分しないもとの波形を「オージェスペクトル」と考えることにする。オージェ電子の運動エネルギーは、関係する電子軌道のエネルギーの差で与えられる。ピークの位置が7.3 eVと8.9 eVの二つあるのは、関係するL軌道や価電子軌道が、それぞれ単一のエネルギーでなく少しずつエネルギーの異なる複数の軌道を含んでいるためである。8.9 eVのピークに対応するオージェ遷移のおこる確率が最も高いため、そのピーク強度が最も大きくなっている。また、オージェスペクトルの形状に注目すると、低エネルギー側に尾を引いた形になっている。低エネルギー側にスペクトルが広がった部分は、オージェ電子が、非弾性散乱によりその運動エネルギーの一部を失ったことを示している。また、もう一つ注意すべきことは、図3(a)にも示したように、オージェスペクトルがかなり大きなバックグランド信号を伴うことがある。このバックグランドはプローブ電子が固体であるシリコンと様々な非弾性散乱を繰り返した結果発生した二次電子であり、二次電子は広いエネルギー範囲を持つため、ピークエネルギー近傍の狭い範囲で見るとほぼ一定のバックグランド信号となる。以上述べたような特徴を持つオージェスペクトルは、試料の材質が決まり、プローブ電子のエネルギーや入射角、電子エネルギー分析装置の検出角などが決まれば、上記のような一定の形状となるので、この形状の特徴から逆にオージェ電子の起源(元素および関わった軌道)を特定することも可能である。

【0019】なお、試料表面の電位が正または負にシフトした場合は、オージェ電子が原子から放出されてから検出器に達するまでの間に表面電位のシフト分だけ減速または加速されるので、オージェスペクトルはこれに応じて、形状をほぼ一定に保ったまま、表面電位のシフト量に等しい大きさだけ低エネルギー側または高エネルギー側にシフトする。ただし、電位のシフト量が大きい場合や、電位のシフトが空間的に分布している場合は、オージェスペクトルの形状が変化する場合があるが、仕事関数の変化やPN接合による電位の変化はせいぜい数V迄であり形状の変化は無視できる。図3(b)は、表面の電位が正または負にシフトした場合のオージェスペクトルの変化を示したものである。図中、Aは試料表面の電位が1V正にシフトしたためにオージェスペクトルが1V低エネルギー側にシフトした場合、Bは表面電位の変化がない場合、Cは試料表面の電位が1V負にシフトしたためにオージェスペクトルが高エネルギー側に1Vシフトした場合のスペクトルを示しており、表面の電位の変化に応じてオージェスペクトルがシフトする様子を示している。

【0020】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら従来の構成によるオージェ電子分光装置で、PN接合の解析を試みる場合、半導体試料の表面の界面準位が電荷を帯びることにより、検出されるオージェ電子の運動エネルギーが変化するので、実際には、オージェスペクトルのシフトからPN接合間の電位差(V_a)を正確に測定することができないという問題を有していた。

【0021】ここで、界面準位の帶電の性質を補足するため、「バンドの曲がり」および「フェルミレベルのビニング」(平木昭夫ほか訳:「表面の物理学」、日刊工業新聞社、1991年、p. 111.)という概念について述べる。界面準位のエネルギーはバンド構造における価電子帯と伝導帯の間に分布し、中和した状態はフェルミレベルがほぼバンドの中央付近にある場合に対応する。一方、P型半導体やN型半導体では、バルクのフェルミレベルは、それぞれ、価電子帯や伝導帯の近くのバンド内に位置している。熱平衡状態では、P型半導体やN型半導体におけるバルクと表面のフェルミレベルの不連続を解消するように界面準位が帶電して空乏層をつくり「バンドの曲がり」を伴ってフェルミレベルが平らになる。このとき界面準位も帶電によってフェルミレベルの位置がずれるが、もともと界面準位は単位面積および単位エネルギー当たりの準位密度が極めて高いために帶電によるフェルミレベルのズレは僅かである。よって、表面のフェルミレベルの位置がバルクの導電型に依らず、あたかもフェルミレベルが表面でほぼバンドの中央付近に固定されたかのようにあるまう「フェルミレベルのビニング」が起こる。この「フェルミレベルのビニング」は、PN接合間の電位差(V_a)とPN接合を横切る表面の電位の変化との相関をなくすように作用するので、オージェスペクトルのシフトからPN接合間の電位差(V_a)を測定したい場合には極めて都合が悪い。

【0022】本発明は、オージェ電子分光を半導体装置のPN接合評価に利用する場合に、従来問題となっていた界面準位の悪影響を解消し、半導体装置のPN接合構造を正確に解析する手段とその使用方法を提供することを目的としており、微細化の進む半導体装置の横方向のPN接合の精密な制御が可能となり、半導体装置の性能や信頼性を極限まで向上させることができる。

【0023】

【課題を解決するための手段】この課題を解決するため本発明の半導体解析装置は、従来のオージェ電子分光装置の機能に、試料表面に試料のバンドギャップより大きくかつ試料の仕事関数より小さいエネルギーを持つ光を照射する機能と、その光強度を変調しそれと同期したオージェ電子強度の変動成分を検出する機能を附加した構成を有している。また、試料表面より放出される特定のオージェ電子の運動エネルギーの微小変位を検出する方法として、オージェスペクトルにおけるピーク近傍の最大傾斜付近に電子エネルギー分析装置の分析エネルギ

一を固定した時の信号強度と、ピークから分離したところに電子エネルギー分析装置の分析エネルギーを固定した時の信号強度とを記録し、後者に対する前者の比を求める方法を用いている。また、試料表面を照射する光の光軸の近くに複数個の光検出器を備え、光軸の調整を行うことができる。

【0024】つまり、これら光照射などの手段と方法により、オージェスペクトルのシフトの位置的変化から、PN接合間の電位差(V_a)、さらに、(1)式からキャリア濃度の空間分布を、表面の凹凸に影響されることなく、しかも高い空間分解能で精度良く検出可能な半導体解析装置が実現できる。

【0025】本発明の第1の発明は、通常のオージェ電子分光装置の機能である電子線走査と放出電子のエネルギー分光装置に加えて、試料表面に光を照射する手段を備えたことを特徴とする半導体解析装置であり、光を照射して半導体内部にキャリアを発生させ、試料表面の帶電した界面準位にキャリアを供給し、これを中和することができる。すなわち、半導体試料の表面に存在する界面準位の影響による表面電位の変化を打ち消して、PN接合間の電位差(V_a)を正確に測定できるという効果が得られる。

【0026】本発明の他の発明は、光を照射する手段において、試料表面に照射する光のエネルギーを半導体試料のエネルギーギャップより大きく、かつ、同半導体試料の仕事関数より小さいように制限したことを特徴とする請求項1記載の半導体解析装置であり、試料表面からの不要な電子の放出を抑制することができる。すなわち、高いS/N比の測定を安定して実現できるという効果が得られる。

【0027】本発明の他の発明は、光を照射する手段において、試料表面を照射する光の強度を周期的に変調する変調手段と、変調信号と同期して電子検出手段の出力の強度と位相とを抽出する同期検波手段とを備えたことを特徴とする請求項1および請求項2記載の半導体解析装置であり、照射する光の振幅を、光により発生したキャリアが界面準位の帶電を余り中和しない程度に弱く設定することにより、この界面準位の帶電により生じた空乏層を発生したキャリアが移動するために生ずる交流光起電力を測定することができる。すなわち、界面準位の帶電により生じた表面の空乏層の厚さと、そこがP型であるかN型であるかを検出できるという効果が得られる。

【0028】本発明の他の発明は、光を照射する手段において、試料表面を照射する光の光軸の近くに複数個の光検出器を備えたことを特徴とする請求項1および請求項2記載の半導体解析装置であって、照射光の光軸がこの光検出器の位置にさしかかった場合に光軸と検出器の距離を検出器の出力より判断することができる。すなわち、試料周辺に配置される分析のための

装置を妨害する観察窓を設けるなどして試料表面からの反射光等を観察しなくても入射光の光軸を正確に調整することが可能となるという効果が得られる。

【0029】本発明の他の発明は、試料表面より放出される特定のオージェスペクトルのピークの微小変位を検出するため、このピーク近傍の最大傾斜付近に検出器の分析エネルギーを固定した時の信号強度と、ピークから分離したところに検出器の分析エネルギーを固定した時の信号強度とを記録し、後者に対する前者の比を求めることを特徴とした半導体解析方法であって、ピーク強度の変動の要因のうち、表面の凹凸による検出感度の変化の成分を容易に除去することができる。すなわち、少ない測定回数で、表面の凹凸による信号強度の変化と分離してピークのシフトを反映した情報の抽出が可能となるという効果が得られる。

【0030】

【発明の実施の形態】まず、本発明の第1の実施の形態について、図面を参照しながら説明する。

【0031】図1は本発明の半導体解析装置の構成とその動作を示すものであり、図1において、11は強度可変光源、12は変調信号発生器、13はロックインアンプ、14はプローブ電子線軌道、15は放出電子軌道、16は試料照明光、17は光検出器である。

【0032】以上のように構成された第1の実施の形態による半導体解析装置について、以下その動作を説明する。

【0033】まず、電子銃21により放出された電子はプローブ電子線軌道14を描いて半導体試料25に入射する。電子線は走査用電磁コイル22によって半導体試料25の表面の所望の位置に照射できる。半導体試料25の表面から放出される放出電子は放出電子軌道15の様に電子エネルギー分析装置23によって特定のエネルギー成分に分別されてその強度が検出される。電子電流の強度はロックインアンプ13を通して出力される。半導体試料25には同時に、強度可変光源11により試料照明光16を照射することが出来る。試料表面における照明光の照射範囲は電子線を照射している位置を含むよう設定出来る。

【0034】従って、上記の動作により、電子線を照射する間、半導体試料表面に光を照射することで、半導体の内部には光の作用による電子正孔対が発生している。この電子正孔対は、界面準位の帶電によって生じた電界によって移動し、その帶電を中和する作用を持つ。従って、光照射によって、界面準位の帶電によって表面に生じた電位のズレが緩和される。すなわち、光照射によるキャリアの生成という非熱平衡を強制的に導入することによって「フェルミレベルのピニング」による「バンドの曲がり」が解消され、オージェスペクトルのピークのシフト量からPN接合間の電位差(V_a)を検出することができる。この測定をプローブを走査しながら実

行すれば、 V_a の面内分布を得ることが出来、さらに、(1)式を用いれば、キャリア濃度の面内分布に変換することも可能である。

【0035】以上のように本実施の形態によれば、界面準位の問題を回避した正確なキャリア分布の評価が可能になり、デーブサブミクロンの半導体装置の開発に要求される重要な解析技術を提供するものである。

【0036】次に、第2の実施の形態の半導体解析装置について述べる。本形態は第1の実施の形態における半導体解析装置において、照明光源の光のエネルギーを限定したものである。

【0037】照明光源の光を、半導体試料のバンドギャップよりは大きいが仕事関数よりは小さいエネルギーを持つ波長の光と限定すれば、キャリアの発生効果はあるが、光照射単独で試料表面から電子放出すなわち光電子放出が起こることはない。

【0038】シリコンの場合、バンドギャップは室温で約1.08 eV、一方、仕事関数はキャリアの濃度に依存するが、少なくとも真空を基準とした伝導体までのエネルギー4.05 eV以上はあるので、光のエネルギーとしては1.08 eV~4.05 eVすなわち、1115 nm~306 nmの波長を用いればよい。また、光の吸収は波長が短いほど強くなるので、表面でキャリアを効率よく発生するには短波長の方が有利となる。

【0039】本実施の形態では、波長が633 nmのHe-Neレーザーまたは、緑色(約500 nm)の半導体レーザーを使用している。何れの光源を用いる場合も、界面準位の帶電を打ち消すのに必要な数 mW/cm^2 の強度の光照射を行っても、オージェスペクトルのバックグラウンドが増加せず、高S/N比の測定が維持できた。

【0040】このように、第2の実施の形態を適用することにより、さらに、光電子による信号のバックグラウンドの増加を防ぎ、S/N比の高い測定が保証される。

【0041】次に、第3の実施の形態による半導体解析装置について述べる。本形態による半導体解析装置は、第1の実施の形態と第2の実施の形態における半導体解析装置の機能に加えて、照射光の強度を変調する手段と、電子エネルギー分析装置の出力を光変調信号によって同期検波する手段とを備えている。

【0042】まず、変調信号発生器12による正弦波形信号により、強度可変光源11の出力を正弦波状に変化させる。ロックインアンプ13に電子エネルギー分析装置23の出力と変調信号発生器12の信号を入力し、変調信号による同期検波を行う。ロックインアンプ13の出力として、変調信号周波数成分を持つ信号強度および変調信号に対する位相のずれが検出される。

【0043】照明光源として、ここでは緑色(波長約500 nm)の半導体レーザーを使用し、半導体レーザーの駆動電流を変調信号に比例して変化させることで出力を変調した。駆動電流は、直流バイアスに変調信号に比

例した正弦波を重畠したものである。駆動電流の最小値は、レーザー発振の閾値電流を下回る正の値を取るように設定した。その結果、レーザー光の出力波形は、正弦波状(直流成分が伴った正弦波)となり、瞬間最小出力値を0 Wに出来た。なお、駆動電流の最大値はレーザー光出力のピーク強度を数百 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 以下と低くなるように設定した。また、変調周波数の設定は可変であるが、通常は、位置を変化させて多数の測定点をとる必要から、下限を1 kHz以上とした。一方、上限は半導体の光応答速度に依存するので試料によって大きく異なることが予想される。結局、試料に応じ、1 kHz~100 kHz範囲で調整した。

【0044】以上の機能を利用して半導体のPN接合を解析する方法を以下に述べる。

【0045】本実施の形態では、変調する照射光のピーク強度を数百 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 以下と低く設定しているので、界面準位の帶電があまり緩和されない。その場合、光強度を正弦波的に変化させると、その振幅に比例した光起電力 V_{ac} が試料表面発生する。オージェ分光装置でこの光起電力 V_{ac} を検出するには、光起電力 V_{ac} によってオージェスペクトルのピークエネルギーに時間変化が生じることを利用すればよい。

【0046】つぎに、オージェスペクトルのピークエネルギーの時間変化を簡単に測定する方法を図3(c)を用いて説明する。図3(c)は、時間的に変動しているオージェスペクトルの各瞬間の形状を示した模式図で、電子エネルギー分析を瞬時に行なった場合に想定される波形である。図中Dは表面電位が相対的に最も正にシフトした瞬間のスペクトル、Fは表面電位が相対的に最も負にシフトした瞬間のスペクトル、Eは平均的なスペクトル位置である。例えば、P型半導体試料の表面に強度を変調した光を照射する場合、光強度が強いほど界面準位の負の帶電が減少し、表面の帶電が相対的に正の方向に変化するので、オージェスペクトルが低エネルギー側(Dの方向)にシフトする。また、N型半導体試料の表面に強度を変調した光を照射する場合は、光強度が強いほど界面準位の正の帶電が減少し、表面の帶電が相対的に負の方向に変化するので、オージェスペクトルは高エネルギー側(Fの方向)にシフトする。そこで、Eの波形におけるオージェスペクトルの最大傾斜付近に検出器の分析エネルギーを固定しておけば、光の周期的な強度変調に伴って信号強度が周期的に変動するので、これを同期検波すれば、ピークの変化の振幅に比例した出力を得ることが出来る。電子エネルギー分析器の分析エネルギーを(i)に固定したとき、ピークエネルギーが高エネルギー側と低エネルギー側に少し変化すると、これに伴って検出器の出力が(I)から(I)'および(I)"に大きく変化する様子が示されている。なお、実際には光強度を弱く設定しているので、光を照射しない状態と、光を照射しているときの平均的なスペクトルとをほぼ同一と見なせる。

30 20 30 40 50

【0047】オージェスペクトルの各瞬間の形状を示した模式図で、電子エネルギー分析を瞬時に行なった場合に想定される波形である。図中Dは表面電位が相対的に最も正にシフトした瞬間のスペクトル、Fは表面電位が相対的に最も負にシフトした瞬間のスペクトル、Eは平均的なスペクトル位置である。例えば、P型半導体試料の表面に強度を変調した光を照射する場合、光強度が強いほど界面準位の負の帶電が減少し、表面の帶電が相対的に正の方向に変化するので、オージェスペクトルが低エネルギー側(Dの方向)にシフトする。また、N型半導体試料の表面に強度を変調した光を照射する場合は、光強度が強いほど界面準位の正の帶電が減少し、表面の帶電が相対的に負の方向に変化するので、オージェスペクトルは高エネルギー側(Fの方向)にシフトする。そこで、Eの波形におけるオージェスペクトルの最大傾斜付近に検出器の分析エネルギーを固定しておけば、光の周期的な強度変調に伴って信号強度が周期的に変動するので、これを同期検波すれば、ピークの変化の振幅に比例した出力を得ることが出来る。電子エネルギー分析器の分析エネルギーを(i)に固定したとき、ピークエネルギーが高エネルギー側と低エネルギー側に少し変化すると、これに伴って検出器の出力が(I)から(I)'および(I)"に大きく変化する様子が示されている。なお、実際には光強度を弱く設定しているので、光を照射しない状態と、光を照射しているときの平均的なスペクトルとをほぼ同一と見なせる。

11

したがって、分析エネルギーの調整は光照射を切った状態で実施すれば十分である。

【0047】ここで、光強度を正弦波状に変化させることによって振幅に比例した光起電力 V_{ac} が発生する機構を説明する。例えば、緑色(500 nm)より短波長の半導体レーザーを用いた場合、シリコンへの光の侵入深さが1 μm以下になるので、バンドの曲がりにより空乏化した表面の厚さと同程度であり、光により発生したキャリアのほとんどが空乏層に引き寄せられる。一方、空乏層容量は空乏層の厚さ W に反比例するので、結局発生する電圧の振幅は $V = Q/C$ の関係から、空乏層の厚さ W に比例することになる。Gを光照射による単位面積単位時間当たりのキャリア生成個数とし、以上の関係を式化すると以下の(2)式のようになり、光強度の振幅を一定にして光起電力の振幅 V_{ac} を測定すれば空乏層の厚さ W を見積もることが出来る。

$$V_{ac} = q G / \omega C = q G W / \omega \epsilon = q G W / 2 \pi f \epsilon$$

または、

$$W = V_{ac} \omega \epsilon / q G W = 2 \pi f V_{ac} \epsilon / q G W$$

12

ここで、 ω は光の変調角周波数、 f は光の変調周波数、 C は単位面積当たりの空乏層容量、 ϵ は誘電率である。さらに、この方法は、空乏層を光照射で発生したキャリアが移動することによる起電力を測定するので、空乏層の極性によってキャリアの移動する方向すなわち起電力の極性が異なる。別の表現をすれば、空乏層の極性によって起電力の位相が180度異なる。具体的には、P型半導体では光強度が強いほどオージェスペクトルが低エネルギー側にシフトし、逆に、N型半導体では光強度が強いほどオージェスペクトルが高エネルギー側にシフトする。従って、光起電力の位相から空間電荷層の極性す

$$W = \sqrt{(2 \epsilon \phi / q N)}$$

または

$$N = 2 \epsilon \phi / q W^2$$

ここで、 ϵ は誘電率、 ϕ はビニングにより生じたバンドの曲がりであり、0.5 eV前後の値に設定する。バルク中ではドナーまたはアクセプタの濃度 N はキャリア濃度と等しいと見なせるので、以上の方針で N を求めればキャリア濃度の空間分布を知ることが出来る。

【0050】以上のように、第2の実施の形態によれば、キャリア濃度の空間分布と表面がP型であるかN型であるかを同時に判定することができる優れた方法を提供するものである。

【0051】次に、第4の実施の形態による半導体解析装置について述べる。本形態は、第1の実施の形態または第2の実施の形態または第3の実施の形態の半導体解析装置に加えて照射光に対する光検出機能を有する半導体解析装置であることを特徴とする。

【0052】本実施の形態では、第1の実施の形態(図1)において試料照明光16の光軸の位置を確認するのに、光検出器17の信号を利用する。光軸の位置をずらすと4つの光検出器の検出する信号がそれぞれの光軸との重なり程度に比例して出力が変化する。照射光の強度分布が回転対称なガウス分布である場合、光検出器を試料の4方向に対称に設置しておけば、4つの検出器の信号が一致したときに試料の中心に光が照射されることになる。

【0053】他の方法として、試料表面からの反射光によって照射位置を確認できる場合もあるが、通常は、反

* リアのほとんどが空乏層に引き寄せられる。一方、空乏層容量は空乏層の厚さ W に反比例するので、結局発生する電圧の振幅は $V = Q/C$ の関係から、空乏層の厚さ W に比例することになる。Gを光照射による単位面積単位時間当たりのキャリア生成個数とし、以上の関係を式化すると以下の(2)式のようになり、光強度の振幅を一定にして光起電力の振幅 V_{ac} を測定すれば空乏層の厚さ W を見積もることが出来る。

(2)

(2')

※なわちP型半導体かN型半導体かが判断できる事になる。特にPN接合の境界では位相が反転するので接合面を容易に判定することができる。なお、位相は同期検波器の出力の極性や、位相出力で得ることができる。

【0048】一方、空間電荷層の厚さ W は、表面でのフェルミレベルのビニング位置がミッドギャップ近くと仮定すれば、そのアクセプタ濃度(P型半導体の場合)またはドナー濃度(N型半導体)と次式の関係にあるので、この関係と(2)式で求まる W を用いてドナーまたはアクセプタの濃度 N を見積もることが出来る。

【0049】

(3)

(3')

射の方向からの観察が困難であったり、窓から観察しようとすると、オージェ電子分光装置にSEM(走査型電子顕微鏡)の機能が備わっている場合に、SEMの二次電子検出に用いるシンチレータに迷光が入り、SEM観察が妨げられることがある。

【0054】以上のように、この実施の形態によって、確実に照射光の光軸を確認することが可能なうえ、外部からの迷光を遮断できるので、光照射が確実に出来、かつ光軸調整の際にSEMの機能も妨害することがないという利点が得られ、一つの真空装置でオージェ電子分光とSEMといった複数の解析装置を利用する場合に、光照射がこれらの解析装置へ影響することないので、同時測定などが可能となり、解析効率が著しく向上する。

【0055】次に、第5の実施の形態による方法について述べる。この方法は、請求項1および請求項2および請求項3記載の発明による半導体解析装置の何れにも適用できる。

【0056】実際の半導体試料の解析では多くの場合、観察したい試料の表面は理想的な平面ではなくある程度の凹凸があるのが普通である。凹凸がある場合は、完全な平面の場合と異なり、電子線の入射方向や検出器の設置方向によってオージェ電子を検出する効率が、凹凸の影響により観察場所に依存して異なることになる。この凹凸の影響を取り除くため、本実施の形態では、「オージェスペクトルにおけるピーク近傍の最大傾斜付近に検

出器の分析エネルギーを固定した時の信号強度と、ピークから分離したところ（バックグラウンド）に検出器の分析エネルギーを固定した時の信号強度とを記録し、「後者に対する前者の比を求めるという方法」をとっている。バックグラウンドはエネルギーによる信号強度の変化がほとんどないので、バックグラウンド強度の変化は検出感度の変化を反映している。従って、この方法により、サンプルの表面の傾斜が変化してオージェ電子の検出効率が変化しても、バックグラウンドの強度により検出効率の変化を補正することになるので、ピークのシフト量を正確に捉えることが出来る。

【0057】従来は、いちいち分析エネルギーを連続的に変化させることによってピークエネルギーを特定する必要があり、必要なデータ量が膨大となり、測定時間も増加した。本実施の形態では、極めて少ない測定回数で、表面の凹凸による信号強度の変化と分離してピークエネルギーのシフトを反映した情報の抽出が可能となる。

【0058】なお、当然のことであるが、第3の実施の形態では本実施の形態を適用する場合、バックグランドの強度については同期検波しないこととする。

【0059】本実施の形態による方法を、図4を参照して説明する。図4は、第1の実施の形態または第2の実施の形態による半導体解析装置および、第3の実施の形態による半導体解析装置に、本実施の形態による方法を適用した場合の、試料の形状と、以上的方法で得られる信号波形の空間分布図である。

【0060】図4(a)は、半導体試料表面の形状とPN接合の位置を示してある。また、図中に示したようにプローブ電子線は試料に対し垂直方向から入射し、試料表面から斜め方向に放出した電子が電子エネルギー分析装置に入る。図4(b)は分析エネルギーをオージェスペクトルのピークの位置に固定して、光照射を行わない場合の位置による信号の変化で、PN接合の位置とは関係なく、表面の凹凸を反映している。図4(c)は、分析エネルギーをピークから最大傾斜にずらし、かつ光照射を行った場合で、表面の凹凸の影響による信号強度の変化とPN接合によりピークの位置が変化する影響が現れている。図4(d)は、ピークから外れた位置でのバックグラウンドの信号強度の変化を示しており、表面の凹凸の影響で電子エネルギー分析装置の検出感度が変化し、バックグラウンドの信号強度が変化している。図4(e)は、各位置における(c)の信号強度と(d)のバックグラウンドの信号強度との比率を計算したもので、表面の凹凸から分離してPN接合の構造が検出されている。PN接合を横切るときに電子または正孔の濃度が単調に増加または減少するのに対応して、信号強度もこれに従って単調増加している。なお、分析エネルギーをずらす方向をピークの反対側にした場合は単調減少となる。この信号の変化は表面電位の変化であるので、これを(1)式のV。

に等しいと見なせば、キャリア濃度の比率の空間分布を見積もることが出来、さらに既知量であるシリコン基板のキャリア濃度を用いればキャリア濃度の絶対値の分布が得られる。

【0061】次に、本実施の形態による方法を、第3の実施の形態による半導体解析装置に適用した場合について簡単に説明する。図4(f)は、照射光の強度を下げさらに強度変調し、分析エネルギーをピークの最大傾斜部に設定し同期検波を行った場合の結果で、やはり、上記のバックグランドの信号(d)との比率を求めた結果である。凹凸の影響による波形の歪みがない。この場合はPとNで検出される信号の極性が変化しているのと、PN接合の近くではキャリア濃度が下がるために空乏層の幅Wが増加し信号強度が増加する点で第2の実施の形態による測定波形(e)とはカーブの形状が異なる。この曲線から(2)式と(3)式を利用して、キャリア濃度の分布が得られる。第2の実施の形態による測定波形(e)とここで述べた第3の実施の形態による測定波形(f)のいずれの方法でもキャリア濃度分布の評価が可能であるが、同期検波することにより接合の位置が極性の反転する位置になるので、第3の実施の形態による方法ではPN接合位置の判定が容易になる利点がある。

【0062】以上のように本実施の形態に依れば、試料表面の凹凸がある場合でも、検出感度の変化を補正しあつ、短い測定時間でキャリア濃度の空間分布を測定することが可能となるので、短時間で精度の高い解析を実現できる。

【0063】なお、これまでに述べた実施の形態では、光源としてHe-Neレーザーや緑色の半導体レーザーを紹介したが、波長の条件さえ満足すれば、これをArレーザーなどの他のレーザーに置き換えても良いし、必要ならフィルターやYAGレーザー等の光照射手段を用いても良いことは言うまでもない。

【0064】また、光源の強度を変調するのにファラデー素子を用いる方法を紹介したが、これを、機械式のチヨッパーや電気光学素子や液晶など一般に用いられる方法を利用できることは言うまでもない。また、半導体レーザーや発光ダイオードを利用する場合は動作電流を変調することで出力を変調しても良いことは言うまでもない。また、変調波形として正弦波状の実施の形態を示したが、これを、三角波や鋸歯波や矩形波やそれ以外の周期波形に置き換えて良いことは言うまでもない。

【0065】なお、光を照射する代わりに、電子線の強度を増加させることにより、電子正孔対の生成を兼ねることも可能であるが、この方法では電流の増加による電子線の照射損傷により、かえって界面準位が増加したり、あるいは結晶欠陥を生成して実効的なキャリア濃度が増減するなどの悪影響が無視できなくなることや、電子電流を増やすと空間電荷効果などによって電子ビームの径を細く絞るのが困難となり、ラインプロファイルや

15

二次元像を取得する場合の線分解能や空間分解能が低下する問題が生じる。光照射はこのような問題を回避できる優れた手段である。

【0066】以上のように、本実施の形態によれば、オージェ電子分光装置に、試料表面に光を照射する手段と、照射する光の強度を周期的に変調する変調手段と、変調信号と同期して電子検出手段の出力の強度と位相とを抽出する同期検波手段と、光の光軸を検出する光検出手段とを備えることにより、半導体の価電子帯や伝導帯や内核電子軌道のエネルギー、キャリア濃度などを検出可能な半導体解析装置が実現できる。

【0067】

【発明の効果】以上のように本発明は従来のオージェ電子分光装置に、試料表面に光を照射する手段と、照射する光の強度を周期的に変調する変調手段と、変調信号と同期して電子検出手段の出力の強度と位相とを抽出する同期検波手段と、照射光の位置を検出する光検出器とを備えることにより、半導体の価電子帯や伝導帯のエネルギー、キャリア濃度などの分布を高感度に検出可能な優れた半導体解析装置を実現できるものである。この技術を用いることで、微細化の進む半導体装置の横方向のP

N接合の位置を正確に測定することが可能となり、半導*

16

* 体装置の性能を極限まで向上させることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施の形態における走査電子顕微鏡の構成図

【図2】従来のオージェ電子分光装置の構成図

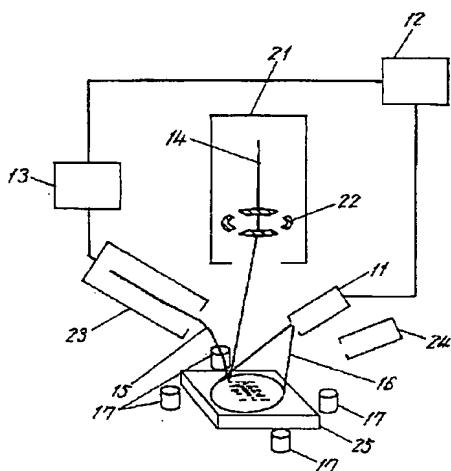
【図3】半導体試料表面のオージェスペクトルを示す図

【図4】試料形状図および電子エネルギー信号波形の空間分布図

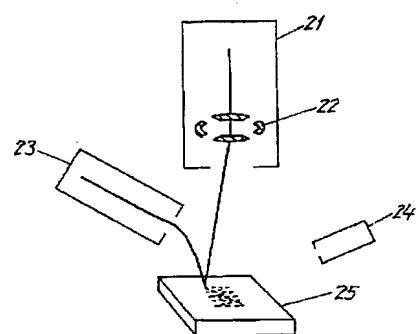
【符号の説明】

10	1 1 強度可変光源 1 2 変調信号発生器 1 3 ロックインアンプ 1 4 ブローブ電子線軌道 1 5 放出電子軌道 1 6 試料照明光 1 7 光検出器 2 1 電子銃 2 2 走査用電磁コイル 2 3 電子エネルギー分析装置 2 4 イオン銃 2 5 半導体試料
20	

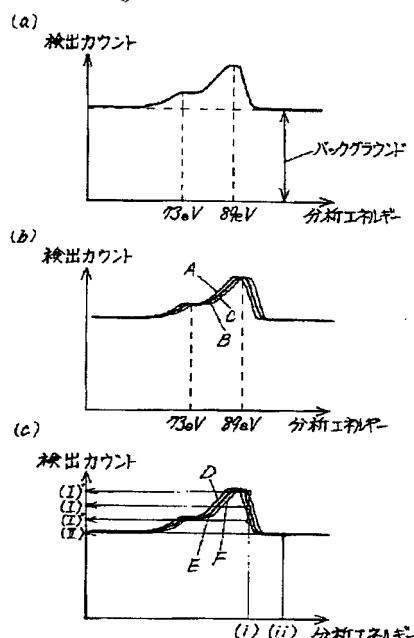
【図1】



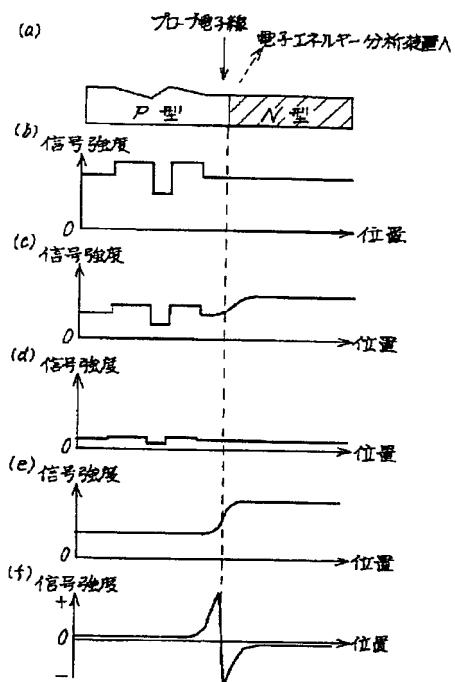
【図2】



【図3】



【図4】



フロントページの続き

F ターム(参考) 2F067 AA00 AA21 AA45 BB01 CC17
EE04 HH06 JJ05 KK05 LL00
QQ02
2G001 AA03 AA07 BA09 CA03 DA01
FA12 FA21 GA01 GA06 GA09
GA10 GA13 JA03 KA01 KA12
LA11 MA05
4M106 AA10 BA02 BA05 CB02 DH04
DH11 DH24 DH32 DH33 DJ11
DJ17 DJ18 DJ19

第7部門(2)

出願人の名義変更

(平成13年10月5日(2001.10.5)発行)

特許公開番号	分類	識別記号	出願番号	旧出願人及び代理人	新出願人及び代理人
2001-144155	H01L 21/66		平11-327997	000005843 松下電子工業株式会社 大阪府高槻市幸町1番1号 代理人 100097445 岩橋 文雄 (外2名)	000005821 松下電器産業株式会社 大阪府門真市大字門真1006番地 代理人 100097445 岩橋 文雄 (外2名)
2001-144169	H01L 21/68		平11-324034	000005843 松下電子工業株式会社 大阪府高槻市幸町1番1号 代理人 100097445 岩橋 文雄 (外2名)	000005821 松下電器産業株式会社 大阪府門真市大字門真1006番地 代理人 100097445 岩橋 文雄 (外2名)
2001-144180	H01L 21/768		平11-327735	000005843 松下電子工業株式会社 大阪府高槻市幸町1番1号 代理人 100077931 前田 弘 (外1名)	000005821 松下電器産業株式会社 大阪府門真市大字門真1006番地 代理人 100077931 前田 弘 (外1名)
2001-144252	H01L 27/04		平11-327998	000005843 松下電子工業株式会社 大阪府高槻市幸町1番1号 代理人 100097445 岩橋 文雄 (外2名)	000005821 松下電器産業株式会社 大阪府門真市大字門真1006番地 代理人 100097445 岩橋 文雄 (外2名)
2001-144307	H01L 29/861		2000-264032	000005843 松下電子工業株式会社 大阪府高槻市幸町1番1号 代理人 100090446 中島 司朗 (外1名)	000005821 松下電器産業株式会社 大阪府門真市大字門真1006番地 代理人 100090446 中島 司朗 (外1名)

上記は出願公開前に承継されたものである。

THIS PAGE BLANK (USPTO)